

## ОТЗЫВ

официального оппонента Острика Афанасия Викторовича на диссертацию Зыонг Минь Дык «Исследование многофазных высокотемпературных реагирующих течений термодинамическим методом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Зыонг Минь Дык относится к области вычислительной физической газодинамики и направлена на развитие численных моделей поведения реагирующих многофазных смесей с учетом свойств реальных газов и протекания равновесных химических превращений. Длительное время и на современном этапе ведутся интенсивные исследования процессов горения и детонации в целях создания высокоэффективных энергетических установок, в которых протекают химические превращения в нагретых газовых смесях. Одним из основных факторов, сдерживающих численное моделирование этих процессов, оказывается отсутствие подпрограмм, рассчитывающих параметры состояния газовой смеси за приемлемое для газодинамических кодов расчетное время на ЭВМ. Традиционно в большинстве работ при исследовании задач горения и детонации в газовых смесях для поведения газов используют модель совершенного газа. Такое использование объясняется удобством и простотой численной реализации уравнений состояния смеси в ущерб физической адекватности модели, что для ряда практически важных задач численного моделирования поведения реагирующих смесей недопустимо. Поэтому работа диссертанта является **практически важной и актуальной**.

При построении всех моделей многофазных реагирующих смесей автором последовательно используется термодинамический подход. Для описания поведения реальных газов выбраны физически обоснованное вириальное уравнение состояния и однофлюидная модель смешения. В основу численного метода решения системы нелинейных уравнения, описывающих смеси реагирующих газов, положен метод Ньютона, обеспечивающий сходимость итерационных процессов при достаточно близком к решению начальном приближении.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 126 наименований. Работа содержит 128 страниц, 47 рисунков, 13 таблиц.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«13» 12 2025

**Во введении** представлен обзор термодинамических методов, применяемых в исследовании химически реагирующих систем, обосновывается актуальность работы формулируется цель и задачи исследования. Материал этого раздела показывает, что диссертант достаточно хорошо ориентируется в современном положении дел по теме диссертации.

**В первой главе** строится физико-математическая модель для смеси совершенных газов, в основу которой положен термодинамический принцип максимума энтропии в равновесном состоянии адиабатической системы. Предложены, детально описаны и реализованы в виде ЭВМ-программ вычислительные алгоритмы, позволяющих решать набор задач, требующихся при численном моделировании течений многофазных равновесно реагирующих смесей. Приведенные результаты тестирования алгоритмов и сравнение этих результатов с данными, полученными по известным и хорошо апробированным программам АСТРА, Terra и Real показывают достоверность созданного программного комплекса. С его помощью получены новые данные о влиянии давления на состав продуктов сгорания керосина в воздухе при избытке горючего.

**Во второй главе** разработанные в первой главе модель и комплекс программ модернизируются для расчета термодинамического состояния химически реагирующих систем с учетом свойств реального газа. Описан алгоритм, позволяющий определять химический состав и термодинамические параметры равновесной системы с применением вириального уравнения в соответствии с теорией Больцмана и кинетической теорией газов для жестких сферических молекул. Проведена проверка достоверности полученных результатов, путем сравнения с расчетами по программе REAL и экспериментальными данными.

Две последующие главы (третья и четвертая) посвящены практическому применению разработанных численных моделей для простейших видов 1D-течений.

**В третьей главе** приводятся физико-математические модели, вычислительные алгоритмы и результаты численного моделирования изоэнтропического расширения продуктов сгорания с учетом образования ионизированных компонентов. Исследуется влияние давления в камере сгорания, а также концентраций щелочных добавок в ней на степень ионизации продуктов сгорания при истечении через сопло жидкостного ракетного двигателя. Полученная информация об изменении степени ионизации по мере прохождения соплового тракта имеет важное практическое значение, поскольку в настоящее время разрабатываются эффективные системы управления работой жидкостных двигателей по данным измерения

электрофизических характеристик продуктов сгорания.

Разработанные численные модели позволили рассчитать ударные адиабаты непрореагировавших газовых смесей и их продуктов детонации в рамках модели реального газа. Проведенное сравнение результатов для скорости детонации в смесях метан-кислород с добавками газов ( $N_2$  или He) с экспериментом и расчетами в рамках модели совершенного газа убедительно показывает на необходимость детального учета свойств газовой среды, что и было сделано в рецензируемой работе.

**В четвертой главе** разработаны вычислительные алгоритмы решения задачи о распаде произвольного разрыва на границе между инертным и детонирующим газами. Задача о распаде произвольного разрыва имеет принципиальное значение для вычислительной механики сплошных сред, поскольку на её решение построена широко используемая схема Годунова и её модификации. На примере системы гелий – стехиометрическая водородокислородная смесь исследовано влияние начального давления на степень отличия результатов, полученных при использовании уравнений состояния реального и совершенного газов. Эти результаты позволяют оценить величину погрешности, допускаемую при использовании модели совершенного газа. В заключительной части главы приведены расчетные результаты для системы аргон – метановоздушная смесь. Получены зависимости параметров детонационных волн и коэффициента сжимаемости от начального давления.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

**Достоверность научных результатов и выводов** диссертации Зыонг Минь Дык обусловлена: корректной физико-математической постановкой рассматриваемых задач и использованием современных численных методов; согласием результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований и расчетов по детально апробированным программным комплексам, таким как АСТРА, Terra и Real.

Результаты диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. Опубликованные в 10 печатных работах (из них 4 статьи входят в перечень ВАК и/или международные системы цитирования) данные содержат полную информацию о полученных в диссертации результатах. Приведенная в диссертации библиография отражает современный уровень проблемы.

**Научная новизна** заключается в следующем.

1. Впервые последовательно и на основе термодинамического подхода построены численные модели поведения смесей реагирующих газов, использующие достоверные и весьма представительные базы данных о

термодинамических свойствах рассчитываемых веществ. Эти модели всесторонне протестированы и апробированы на решении простейших, но практически важных задач.

2. Убедительно показано влияние вида уравнения состояния газов, входящих в состав смеси, на результаты расчетов термодинамически равновесных параметров для изоэнтропических равновесных 1D-течений, ударных адиабат, детонации Чепмена-Жуге смесей водород-кислород, метан-кислород-азот-инертный газ.

3. Разработан новый вычислительный алгоритм решения задачи о распаде произвольного разрыва для случая, когда слева и справа от начального разрыва и результирующего контактного разрыва газовая смесь может быть, как замороженная, так и равновесная и описываться как уравнением состояния совершенного, так и реального газов. На его основе получены количественные характеристики, описывающие влияние уравнения состояния газов на реализующиеся при решении задачи о распаде произвольного разрыва параметры течения, для газовых пар: гелий – смесь водорода с кислородом, аргон – смесь метана с воздухом.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что разработанные физико-математические модели и комплекс программ для ЭВМ могут использоваться и повысят адекватность получаемых результатов при численном моделировании многомерных течений с равновесными химическими превращениями в технологических и энергетических установках, работающих при высоких давлениях и температурах.

По диссертационной работе можно сделать **следующие замечания**.

1. Не проверяется выполнение достаточного условия достижения максимума энтропии в численном решении (решается система нелинейных уравнений, которые соответствуют лишь необходимым условиям экстремума). По мнению рецензента, такая проверка повысила бы степень достоверности получаемого решения.

2. Не формулируются обобщенные количественные критерии применимости модели совершенного газа к рассматриваемому кругу задач, несмотря на то, что многочисленные численные исследования в диссертации направлены на получение таких критериев.

3. В заключении нет ни одной количественной характеристики, несмотря на то, что получено большое количество значимых численных результатов. Сделанные замечания не изменяют положительной оценки работы Зыонг Минь Дык и носят характер пожеланий для дальнейших исследований.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Полученные результаты могут быть использованы в практической деятельности

научно-исследовательских учреждений, занимающихся разработкой программных расчетных комплексов для решения задач вычислительной физической газодинамики, в частности расчетов процессов горения и детонации: Института прикладной математики имени М. В. Келдыша РАН, Института математического моделирования РАН, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН и многих других.

**Заключение.** Диссертационная работа Зыонг Минь Дык «Исследование многофазных высокотемпературных реагирующих течений термодинамическим методом» полностью удовлетворяет квалификационным требованиям, изложенным в пункте 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г. Автореферат соответствует всему содержанию диссертации.

Диссертация выполнена на **актуальную тему**, содержит **научную новизну**, имеет законченный характер, соответствует паспорту специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы, удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, а ее автор, Зыонг Минь Дык, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент  
главный научный сотрудник  
отдела Экстремальных состояний вещества  
ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
доктор технических наук  
по специальности 20.00.14 «Вооружения и военная техника. Комплексы и системы военного назначения», профессор

«09» 12 2022 г.

Острик Афанасий Викторович

e-mail: ostriuk@icp.ac.ru

служебный телефон: +7(496-52) 2-52-44, моб. телефон: +7(926) 981-32-43

служебный адрес: 142432, г. Черноголовка, пр. Акад. Семенова, д.1, ИПХФ РАН

домашний адрес: 142432, г. Черноголовка, ул. Коммунальная 3-А, кв.31.

Я, Острик Афанасий Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Зыонга Минь Дыка, и их дальнейшей обработкой.

Подпись А.В. Острика заверяю  
Ученый секретарь ФИЦ ПХФ и МХ РАН  
Доктор химических наук



Б.Л. Психа

С отзывом ознакомлен

13.12.2022